



CIRAD-Forêt

**IDEFOR**

Département Forestier

**Bingerville - ABIDJAN - Anguédédou  
République de Côte d'Ivoire**

# **FORMATION A LA VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE**

En collaboration avec le

**PÔLE REGIONAL AFRICAIN  
DE THERMOCHIMIE**



Ademe



IEPF



# UTILISATIONS INDUSTRIELLES : LA PRODUCTION DE FORCE MOTRICE OU D'ELECTRICITE

**Philippe Girard - Gérard Antonini**

Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement,  
Montpellier, France.

Université Technologique de Compiègne, France.

La vapeur d'eau est largement utilisée dans le domaine industriel pour le transfert de l'énergie thermique. Cette utilisation peut être associée à celles des moteurs et des turbines à vapeur (utilisation de l'énergie de détente pour la transformer en énergie mécanique) et permettre ainsi la conversion partielle de l'énergie thermique en énergie mécanique. La vapeur est retenue comme fluide de transfert pour les raisons suivantes :

- elle est produite à partir de l'eau qui est généralement disponible,
- elle contient non seulement l'énergie de chaleur sensible mais aussi l'énergie de la chaleur latente de vaporisation,
- elle permet de transporter et de stocker une large quantité de chaleur à la température souhaitée.

## 1 - PROPRIETES DE LA VAPEUR

### 1.1 - VAPEUR SATUREE

Pour changer l'eau en vapeur, il convient d'amener la température de l'eau à son niveau de température d'ébullition en augmentant sa chaleur sensible. La chaleur latente est ensuite nécessaire pour changer l'eau en vapeur. Dans une bouilloire à pression atmosphérique 419 kJ/kg de chaleur sensible seront nécessaires pour passer de la température de 0°C au point d'ébullition 100°C. Pour convertir 1 kg d'eau en vapeur, 2257 kJ additionnels seront nécessaires. Si la pression augmente le point d'ébullition augmente. Pour une pression comprise entre, 1 < P < 100 bars (P = pression absolue) la température de vapeur saturante ( $t_s$ ) peut s'exprimer comme suit:

$$t_s (^{\circ} \text{C}) = 100 \times \left[ \frac{P^{1/4}}{0,765} \right]$$

Le contenu énergétique exprimé en kJ/kg d'1kg de vapeur ( $J_s$ ) est la somme de la chaleur sensible de l'eau au point d'ébullition en kJ/kg ( $q_s$ ) et la chaleur latente de vaporisation ( $r$ ).

$J_s$  peut être obtenu avec une précision suffisante par la formule simplifiée :  $J_s = 2\,500 + 1.7 t_s$



Pour des applications de type échangeurs, autoclaves, séchoirs, réacteurs, etc, la vapeur saturée est préférée, due aux avantages suivants :

- les transferts de chaleur s'effectuent à température constante,
- la chaleur est uniforme sur toute la surface de "l'échangeur",
- haut coefficient de transfert.

## **1.2 - LA VAPEUR SURCHAUFFEE**

A pression constante, si de la vapeur saturée est soumise à la chaleur, sa température augmente au delà de sa température de saturation. Les tables de vapeur fournissent l'enthalpie de la vapeur en fonction de la température et de sa pression.

La vapeur surchauffée est généralement employée pour :

- des procédés spécifiques en utilisation directe (stérilisation, ...)
- alimenter des turbines, des moteurs à vapeurs.

D'une certaine manière une légère surchauffe est recherchée pour le transport de la vapeur de manière à éviter les systèmes destinés à réduire les pertes thermiques et éliminer les condensations. Normalement, suivant les réseaux de vapeur, une surchauffe de 20°C à 40°C est recherchée. Dans le cas où les transferts de chaleur sont recherchés, la vapeur surchauffée n'est pas à recommander suite à ses caractéristiques équivalentes à celles d'un gaz. L'utilisation de vapeur surchauffée peut en effet être très préjudiciable en terme de productivité sans même prendre en considération les aspects du coût relatifs à l'augmentation de consommation en combustible, d'investissements et de maintenance associés à la production de cette vapeur.

## **1.3 - LA PRESSION DE VAPEUR**

La vapeur doit être générée à la pression fixée par les équipements nécessitant la plus haute pression dans le système. Dans la pratique la pression de vapeur retenue est toujours un compromis entre le coût d'investissement et le rendement global de l'installation.

Les avantages des réseaux de distribution à haute pression sont les suivants :

- le diamètre des tubes est plus faible (quand la pression augmente, le volume spécifique de la vapeur décroît) ce qui a pour conséquence de réduire l'investissement,
- les surfaces à isoler sont plus faibles.

Les désavantages sont les suivants :

- la possibilité d'avoir à utiliser des épaisseurs de fer plus importantes ce qui augmente les coûts,
- une augmentation des risques de fuites et des pertes, une plus grosse consommation spécifique de combustible, un coût d'investissement chaudière et de maintenance plus élevé,
- la pression de vapeur peut être réduite au travers d'une vanne mais devra être désurchauffée avant de pouvoir être utilisée dans le process.

Pour des unités utilisant une faible quantité de vapeur surchauffée comparativement aux besoins de vapeur basse pression, la possibilité d'avoir deux générateurs devra être étudiée.

## 2 - LES TURBINES A VAPEURS (Cf photo 1)

L'utilisation de la vapeur pour le transfert de chaleur peut être associée avec une turbine à vapeur afin de permettre une conversion partielle de l'énergie thermique en énergie mécanique. Le principe de ces machines est de convertir l'énergie de détente en énergie mécanique. La vapeur haute pression se détend dans la turbine et est ensuite libérée à une pression plus faible ou condensée et recyclée en fonction des types d'équipements.

### 2.1 - CONCEPTION ET PROCÉDES

La conception des turbines est très variable d'un constructeur à l'autre. On peut cependant mentionner les caractères généraux suivants :

- Dans presque tous les cas, le flux de vapeur se fait axialement. Les turbines comportent, en général, plusieurs étages (roues) en série, ce qui permet de limiter les vitesses d'écoulement de la vapeur, et traiter les fortes détenteurs avec un bon rendement thermodynamique.
- Chaque étage est composé d'un aubage fixe dans lequel se fait la mise en vitesse de la vapeur et d'un aubage mobile où la vapeur, déviée, transmet son énergie cinétique à l'arbre de la turbine.

Dans les turbines dites à action, la totalité de la détente se fait dans l'aubage fixe. Au contraire, dans les turbines dites à réaction, la détente se fait partiellement dans l'aubage mobile comme l'illustre le schéma ci-après.

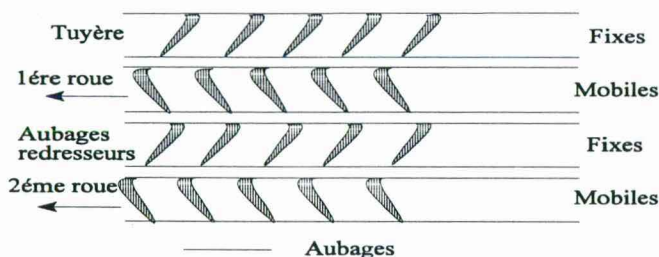
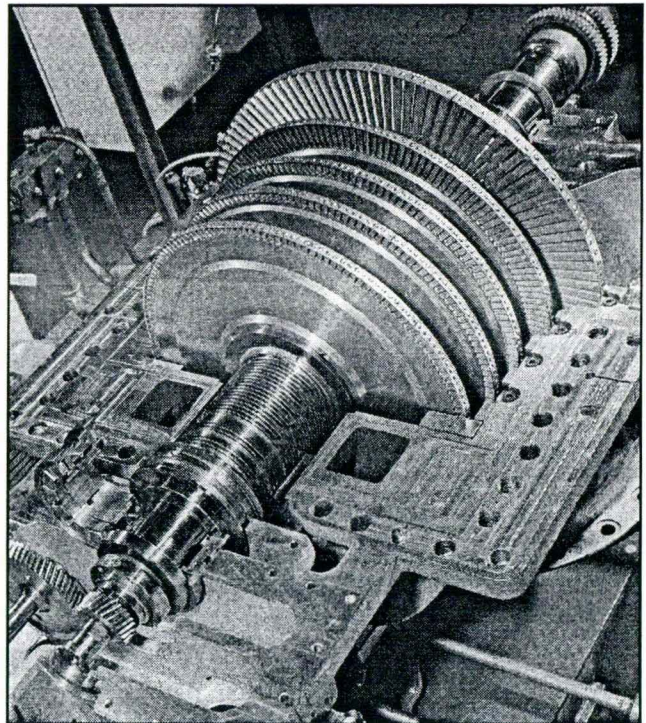


Schéma de principe d'une turbine multi-étagée



La vapeur haute pression est admise au tore d'admission et passe dans les tuyères sur les aubages d'une première roue. A la sortie de cette roue, elle est reprise par des aubages fixes qui lui redonnent la direction voulue et la renvoient sur une deuxième roue, et ainsi de suite. Le classement en turbines à action et à réaction ne concerne que le constructeur. L'utilisateur aura avantage à classer les turbines en fonction d'autres critères :

- pression/température à l'admission,
- pression à l'échappement,
- puissance,
- rendement et prix.

On donne dans le tableau 1 suivant un aperçu général de la gamme des machines disponibles.

Type	Admission		Puissance MW	Nombre roues	Vitesse Hz	Applications
	P	T				
	bar	°C				
A) Condensation	130-225	540	>100	multi	3000 à 3600	Centrale électrique grosse puissance
	50 à 120	400-540	5 à 100	multi		Centrale électrique faible puissance
	40	<400	3 à 20	multi		Entrainement compresseurs
	4	env.230	0,5 à 5	multi	<12000	Entrainement turbomachine Entrainement pompes d'eau
B) Contre-pression	120	540	5 à 30	multi	3 000	Centrale électrique
	30-80	450-480	3 à 25	multi	3000	Centrale électrique en usine
	15-40	300 à 400 maxi	0,1 à 2	mono	3000 à 12000	Entrainement turbomachine et rarement alternateur
C) Soutirage et condensation	Ad.120	500-530	10 à 100	multi		Centrale électrique et entraînement compresseurs
	Ex.4 -60	450-480	5 à 20	multi	3000 à 12000	Entrainement compresseurs
	Ad.30-80 Ex.4-30 Ad.40 Ex.4-20	<400	5 à 20	multi		Entrainement turbomachines
D) Soutirage et contre-pression	Ad. 120	535	10 à 30	multi		Centrale électrique
	Ex.40-20 Ad.40-80 Ex.20-4	400-480	1 à 150	multi	3000 à 12 000	Entrainement turbomachine

Ad. : Admission

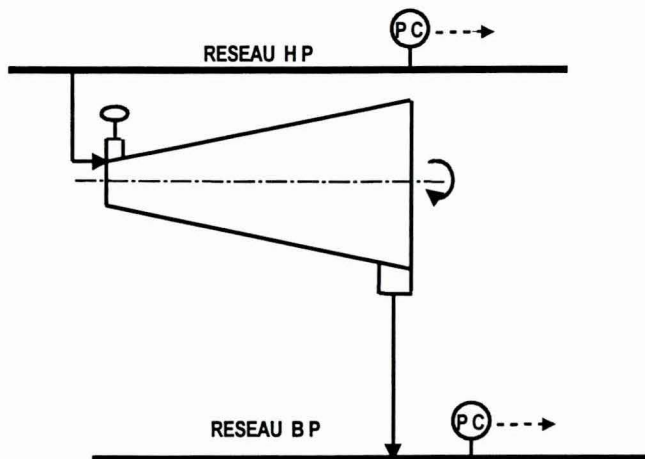
Ex. : Extraction

**Tableau 1 : Caractéristiques des turbines à vapeur** (Source : E.HUGOT)

On distingue 4 grandes classes de turbines en fonction des applications comme illustré ci-après:

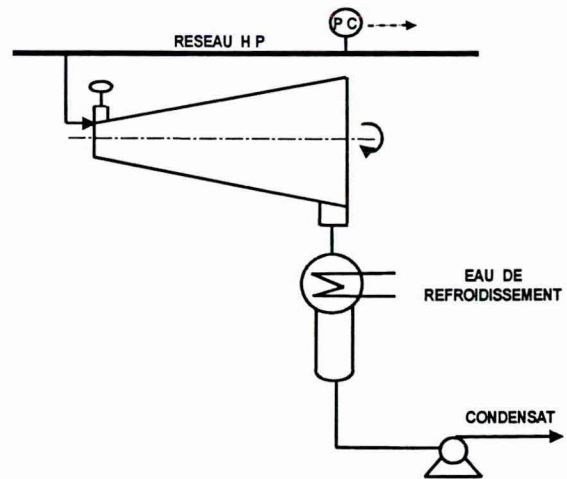
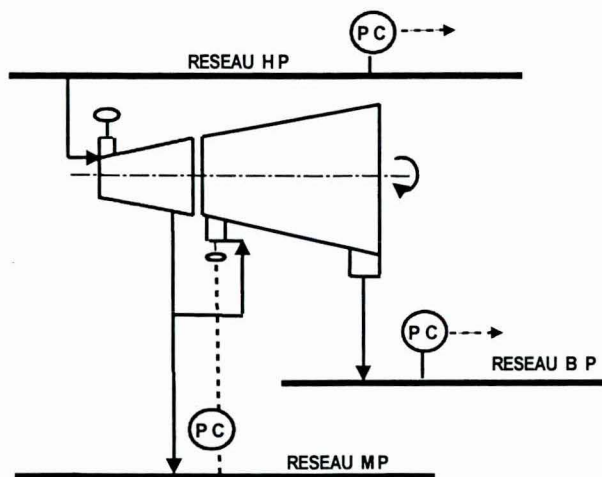
### Turbines à condensation (ci-contre)

La vapeur traverse la turbine et s'échappe dans un condenseur de vapeur généralement sous vide. Le refroidissement est obtenu, soit par de l'eau d'un réseau bouclé ou ouvert, soit par de l'air.



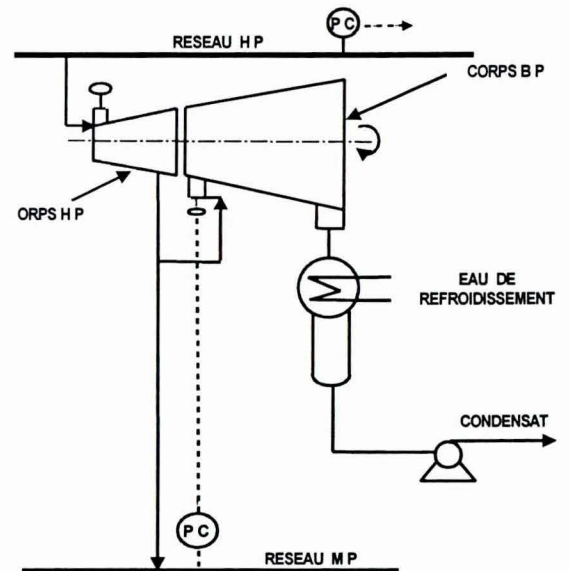
### Turbines à soutirage et condensation

La vapeur partiellement détendue dans la partie haute pression de la turbine est extraite par une tubulure latérale sur le corps de la turbine. Une partie de la vapeur alimente un réseau à pression constante MP, une autre partie retourne à la turbine et est détendue dans la partie basse pression.



### Turbines à contre-pression

La vapeur traverse la turbine et s'échappe dans un réseau de vapeur dont la pression est régulée par ailleurs.



### Turbines à soutirage et contre-pression

La principe est identique à celui ci-dessus, mais l'échappement basse pression BP se fait dans un réseau dont la pression est régulée par ailleurs.

Il faut noter que les turbines à soutirage permettent la régulation à la fois de la vitesse/puissance de la turbine et de la pression à l'extraction. La description du système dépasserait l'objet de ce chapitre, mais il joue un grand rôle dans l'application des turbines à vapeur à la cogénération chaleur-force.

Les constructeurs proposent des gammes standard pour les turbines monoroue à contrepression et dans une certaine mesure pour les turbines à condensation et à contre-pression multiétagées. Pour les autres types, il s'agit le plus souvent de fabrication sur mesure en utilisant des éléments standard.

## 2.2 - PERFORMANCES

Le tableau 2 ci-dessous donne les fourchettes de rendements constatés pour les turbines en fonction de la puissance et du type.

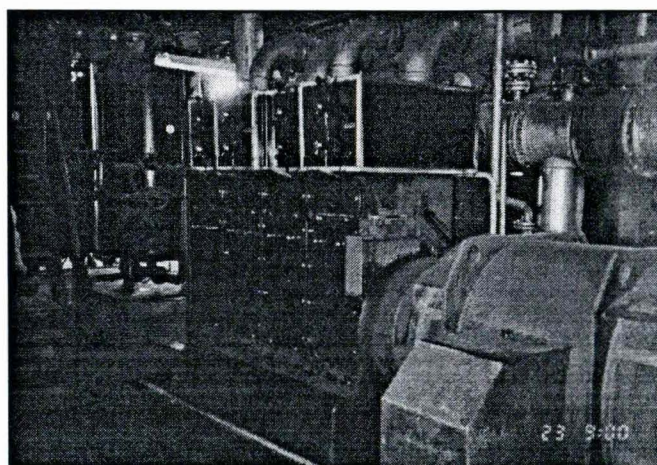
Type	Puissance en MW	Plage de rendement
<b>Contre-pression</b>		
Monoétagé	0,1 - 1	0,4 - 0,5
Multiétagé	1 - 5	0,65 - 0,75
Multiétagé	1 - 25	0,75 - 0,80
<b>Condensation</b>		
Multiétagé	3 - 20	0,70 - 0,76
Multiétagé	20 - 50	0,76 - 0,80

**Tableau 2 : Gamme de rendements pour les turbines (Source : M.J. Ferraris)**

Notons par ailleurs que le rendement baisse à charge réduite. Il y a donc une charge minimale continue au-dessous de laquelle il est peu économique de fonctionner.

## 3 - LES MACHINES A VAPEUR

Très utilisées au début de l'aire industriel, les machines à vapeur ne sont aujourd'hui pratiquement plus utilisées, notamment pour leur faible performance et leur faible capacité. Néanmoins, leur robustesse, leur faible besoin de maintenance en font des outils particulièrement adaptés pour les PED où les agro-industries notamment sont assez largement excédentaires en déchets de biomasse .





Ainsi, 2 000 moteurs à vapeur seraient toujours en fonctionnement dans les rizeries thaïlandaises et 7 constructeurs fabriquent encore ces équipements en Thaïlande.

En Europe, seul SPILLING (Allemagne) fabrique toujours des moteurs à vapeur. La photo 2 présente une installation SPILLING de 750 KVA à contrepression installée en RCA.

Les différents types de machines à vapeur sont décrits ci-après :

### **3.1 - MACHINES A TIROIR**

Les machines à tiroir cylindrique se rencontrent encore. Le tiroir cylindrique se prête seul aux grandes vitesses (600 tours/minute) et fort bien aux hautes températures et même à la surchauffe (275° à 300°C). Il est équilibré et présente une bonne étanchéité. Le meilleur type de machine à tiroir cylindrique est la machine double verticale type Larbodière. Elle forme la solution idéale pour tous les petits groupes électrogènes. Elle est simple et rustique.

### **3.2 - MACHINES CORLISS**

La Corliss, déjà ancienne (1849) mais de conception particulièrement ingénieuse et heureuse, est encore très en honneur en sucreries de canne notamment. La Corliss se prête mal aux hautes températures et à la surchauffe, qui ne devra guère dépasser 250°C. Elle n'est pas indiquée pour les pressions supérieures à 9 bar (6 à 9 bars). Elle ne se prête pas non plus aux grandes vitesses et ne dépasse guère 80 à 100 tours/mn. Elle constitue une excellente solution pour les pressions moyennes (6 à 8 bars) et les faibles vitesses (50 à 80 tr/mn).

### **3.3 - MACHINES A SOUPAPES**

La machine à soupapes présente le gros intérêt de se prêter aux températures élevées et à la surchauffe. On fait des machines à soupapes pour des pressions d'admission allant jusqu'à 15 bars (8 à 15 bars), et même au-delà, et pour des surchauffes allant jusqu'à 300°C. Cette faculté permet à la machine à soupapes de fonctionner dans des conditions thermodynamiques particulièrement favorables et donne ainsi la possibilité d'atteindre avec des machines à vapeur, des consommations de vapeur comparables à celles réalisées, par des groupes turbo-alternateurs à haute pression et haute surchauffe.

### **3.4 - MACHINES A PISTONS-VALVES**

Les machines à vapeur à distribution par pistons-valves présentent à peu près les mêmes caractéristiques que celles à soupape mais ne tiennent pas les très hautes températures. Leur rendement thermodynamique ( $\pi$ ) dépend des pertes de charge, de l'admission, de la compression, de l'isolation, de la vitesse du piston, de la surchauffe, etc.



	$\pi$
Machines à action directe (pompes duplex)	0,25 à 0,35
Machines à tiroir avec régulateur à étranglement	0,40 à 0,50
Machines à tiroir cylindrique avec régulateur à étranglement	0,45 - 0,55
Machines à détente Rider avec détente variable	0,55 - 0,65
Corliss	0,65 - 0,70
Machines à soupapes	0,70 - 0,75

### 3.5 - ETAT DE L'ART

Les équipements brésiliens MERMAK et allemands SPILLING correspondent probablement aujourd'hui aux seuls matériels de série proposés sur le marché. Des machines à vapeur de conception vétuste continuent d'être fabriquées à l'unité et sur demande par quelques petits ateliers en Asie (7 fabricants identifiés en 1992 en Thaïlande). Dans les pays industrialisés, plusieurs constructeurs seraient encore en mesure de produire les versions les plus évoluées et les plus performantes de ce type d'équipement. Leur production, alors à l'unité, rend cependant leur coût prohibitif.

Nous retiendrons qu'il existe un potentiel de transfert technologique susceptible de permettre la relance de la filière moteur à vapeur sous réserve de la mise en évidence d'un marché suffisant que leur fiabilité et leur créneau de puissance rendent envisageable dans un contexte de promotion forte de la valorisation énergétique de la biomasse. Rappelons qu'avec la filière gazéification/moteur thermique, la filière vapeur/moteur alternatif à vapeur est la seule à permettre la couverture de la demande en faible puissance (< à 400 kW) c'est-à-dire la demande de la petite industrie, de l'artisanat et des villages.

## 4 - QUELQUES CONSIDERATIONS D'ORDRE ECONOMIQUE

Au plan économique, la cogénération : production conjuguée de force motrice (électricité) et de chaleur (vapeur) s'avère très compétitive lorsque la matière première résiduaire peut être retenue à coût nul et lorsque les process conjuguent besoins en force motrice et en vapeur. Cela est le cas de nombreuses industries de transformation du bois et des agro-industries (pâte à papier, contre plaqué, scieries, huileries,...). Ces secteurs sont équipés ou susceptibles d'être équipés dans des conditions performantes même dans les régions où les produits pétroliers sont bon marché. Notons que les niveaux d'investissement sont élevés (1 000 à 1 500 US\$ par kW installé) dans le contexte agro-industriel et pour la gamme de puissance concernée (1 à 5 MW).

Les temps de retour sont d'autant plus favorables et acceptables :

- que les installations tourneront avec un facteur de charge élevé et aussi voisin que possible de leurs capacités nominales,

- que des besoins conjugués en force motrice et en vapeur (cogénération) permettront de maximiser la valorisation de l'énergie produite,
- que le nombre d'heures de travail annuel sera plus conséquent (résultats optimum dans les secteurs tournant 24/24h tous les jours de la semaine),
- que l'on pourra substituer une destruction coûteuse des sous produits récupérés.

Lorsque ces conditions sont réunies, pour autant que l'investissement puisse être consenti, ces filières s'avèrent très intéressantes, et pour fixer des idées, on trouvera ci-dessous le cas d'un complexe industriel au SARAWAK et l'installation d'une unité de production l'électricité de 2,5 MW (filiale vapeur/ turbine) avec pour objectif l'auto-alimentation d'un complexe industriel du bois en régime normal (les besoins en pointe restant prélevés sur le réseau) :

- Investissement 1992	4 M US\$
- Production annuelle	11 000 à 15 500 MWh
- Economie de produits pétroliers	3 400 à 3 700 t/an
- Taux Interne de Rentabilité (selon le taux de charge)	21 à 30%
- Temps de retour (selon le taux de charge)	3,4 à 4,1 années
- Prix de revient actualisé (12%)	0,036 à 0,05 US\$/kWh
- Prix actuel de kWh réseau	0,065 US\$/kWh

Par contre, lorsqu'une utilisation est limitée à 8 ou 10 heures par jour et que le facteur de charge électrique avoisine les 50 % sans utilisation de la vapeur générée, les performances peuvent être très défavorables. **Une étude sérieuse de faisabilité technique et économique s'imposera donc de manière impérative.**

## 5 - EXEMPLE DE CALCUL DE RENDEMENT DE CHAUDIERE

### 5.1 - *DONNEES DE BASE* (cf. schéma)

#### Analyse élémentaire :

- Combustible (%) :	Carbone : 46.15	Hydrogène : 3.06
	Oxygène : 10.21	Azote : 1.58
	Cendres : 31.80	Humidité : 7.20
- PCS combustible (Mj/Kg) :	18.48	Alimentation combustible (t/h) : 1.875
- Vapeur générée :	30 bar, 292 °C, 9.9t/h	Température eau : 105 °C
- Purge (Kg/h) :	105	CO <sub>2</sub> % dans les fumées : 8.5
- Air ambiant :	31°C, 85 % R.H.	Température des fumées (°C) : 180
- PCS cendres (Kj/Kg) :	3,360 kJ/kg	PCS cendres volantes (Kj/Kg) : 1,900
- Ratio (cend/cend.volantes)	90 / 10	

### 5.2 - *METHODE DIRECTE*

- Enthalpie de la vapeur (M j/h)	= 2,983 MJ/kg x 9,900 kg/h = 29,532
----------------------------------	-------------------------------------



- Purge (Kg/h) = 105
- Vapeur/flash de la purge (%) = 24.5
- Volume total purge (Kg/h) =  $(105 \times 100) / (100 - 24.5) = 139$
- Volume eau d'alimentation (Kg/h) =  $9,900 + 139 = 10,039$
- Enthalpie eau d'alimentation (Mj/h) =  $0.441 \text{ MJ/kg} \times 10,039 \text{ kg/h} = 4,427$
- Contenu énergétique du combustible =  $1,875 \text{ kg/h} \times 18.48 \text{ MJ/h} = 34,650 \text{ MJ/h}$
- Rendement de chaudière (%) =  $(29,532 - 4,427) \times 100 / 34,650 = 72.5$

### 5.3 - METHODE INDIRECTE

#### 5.3.1 - Pertes dans les fumées sèches (par kg de combustible)

- $O_2$ , théorique (moles) = Moles de C + Moles de  $H_2$  - Moles de  $O_2$   
 $= (0.4615 / 12) + (0.030622 / 4) + (0.10206 / 32)$   
 $= 0.04292$
- Air, théorique (moles) =  $0.04292 \times 4.76 = 0.2042$
- $N_2$  théorique (moles) =  $0.04292 \times 3.76 + (0.01582 / 28) = 0.169442$
- %  $CO_2$ , théorique =  $(0.4615/12) / (0.1619442 + (0.4615/12)) = 19$
- %  $CO_2$ , réel = 8.5
- % Air excès =  $79 \times (CO_{2,t} - CO_{2,A}) / CO_{2,A} (100 - CO_{2,t}) =$   
 $= (79 \times (19.1 - 8.5) / 8.5 \times (100 - 19.1)) \times 100$   
 $= 123$
- Moles d'air (Kg) =  $(1.23 + 1) \times 0.2043 = 0.4556 \text{ moles} = 3.141$
- Perte dans les fumées sèches (Kj/Kg) =  $mCp\Delta T = 3.141 \times 1.1 \times (180 - 31)$   
 $= 2153.8$

#### 5.3.2 - Pertes dues à l'humidité de l'air

- Humidité relative = 85% ( 0.0204 Kg/Kg de of dry air)
- Air sec de combustion = 13.141 Kg/Kg de combustible
- Humidité de l'air =  $13.141 \times 0.0204 = 0.2681 \text{ Kg}$
- Pertes dues à l'humidité de l'air =  $mCp\Delta t = 0.2681 \times 1.68 \times (180 - 31) = 67.1 \text{ Kj/Kg}$

#### 5.3.3 - Pertes dues à l'humidité du combustible

- Humidité du combustible = 7.2% (0.072 Kg/Kg de combustible)
- Pertes dues à l'humidité du combustible =  $m\Delta H = 0.072 \times (2.846 - 130) = 195.6 \text{ Kj/Kg}$

#### 5.3.4 - Pertes de chaleur latente de vapeur dues à l'eau formée

- Quantité d'eau formée =  $(0.030622 / 2) \times 18$   
 $= 0.2756 \text{ Kg/Kg de combustible}$
- Pertes dues à la vapeur formée =  $0.2756 \times (2.846 - 130) = 748.5 \text{ Kj/Kg}$

### 5.3.5 - Pertes dues aux imbrûlés dans les cendres

- PCS cendres = 3.360 Kj/Kg
- % de cendres du combustible = 31.8
- % de cendres / Kg de combustible =  $(0.318 \times 0.9) / (1 - (3.36 / 18.36))$   
= 0.398 Kg/Kg brûlé
- pertes dues aux imbrûlés =  $0.3498 \times 3.360 = 1.1753$  Kj/Kg  
dans les cendres

### 5.3.6 - Pertes dues aux imbrûlés des cendres volantes

- PCS cendres volantes = 1.9 KJ/KG
- Total cendres collectées comb. =  $(0.318 \times 0.1) / (1 - (1.9 / 18.48)) = 0.03544$  Kj/Kg
- Pertes dues aux cendres volantes =  $0.035544 \times 1.9 = 67.3$  Kj/Kg

### 5.3.7 - Pertes dues aux purges

- Quantité de purge = 139 kg/h
- Pertes dues aux purges =  $139 \times 4.2 + (233 - 31) = 117,928$  kJ/h
- Pertes dues aux purges/Kg de comb. =  $(117.928 / 1.875) = 92.9$  Kj/Kg

### 5.3.8 - Résultats

- **Total pertes** (sans pertes par radiation) =  $1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 = 4470.5$  kj/kg
- **Rendement chaudière** =  $(18.48 - 4470.5) / 18.48) \times 100 = 75.8 \%$
- **Rendement chaudière** (meth.directe) = **72.5 %**
- **Pertes dues aux radiations** =  $75.8 - 72.5 = 3.3 \%$

